

**VŠB-Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta stavební**  
**Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství**

**Vliv konzistenčních vlastností metakaolínů na vlastnosti čerstvého  
a ztvrdlého betonu**

**The influence of rheological properties of metakaolins on the  
parameters of fresh and hardened concrete**

**Student:** **Lukáš Radkovič**  
**Vedoucí bakalářské práce:** **Ing. Martin Vavro, Ph.D.**

**Ostrava 2010**

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

Ostravě

.....

.....

Lukáš Radkovič

### **Prohlašuji, že**

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

.....

Lukáš Radkovič

## **Anotace**

V současné době je snaha, při výrobě materiálů pro stavební účely, dosáhnout co možná nejnížší energetické náročnosti při výrobě a vlivu na životní prostředí. Proto se snažíme suroviny používané do betonu nahradit jinými, méně energeticky náročnými surovinami. Jednou s takových přísad je i metakaolín, kterým se budu zabývat v této bakalářské práci.

Tato práce je systematicky členěna na část teoretickou, obsahující přehled výroby a vliv metakaolínů na vlastnosti cementu a betonu a část praktickou, kde je popsáno stanovení základních vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu a dále také hlavně porovnání konzistence metakaolínu v suspenzi s vodou, s konzistencí čerstvého betonu s metakaolínem.

## **Annotation**

Currently, the effort in the production of materials for building purposes is to achieve the lowest possible energy consumption in production and environmental impact. Therefore, we try to replace raw materials used in concrete by other, less energy-intensive materials. One such ingredient is metakaolin, which I will address in this Bachelor's thesis.

This thesis is systematically divided into theoretical part contains an overview of production and metakaolin influence on properties of cement and concrete and practical part, which describes the determination of basic properties of fresh and hardened concrete and also especially compared metakaolin consistency in suspension with water, with the consistency of fresh concrete with metakaolin.

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod.....</b>	<b>8</b>
<b>2.</b>	<b>Přehled způsobů průmyslové výroby metakaolínů a stručná sumarizace vlivu přidavku metakaolínu na vlastnosti cementu a betonu .....</b>	<b>9</b>
2.1	Suroviny pro výrobu a výroba metakaolínů .....	9
2.2	Vliv přidavku metakaolínu na vlastnosti cementové malty a betonu .....	13
<b>3.</b>	<b>Stanovení vlastností vstupních metakaolínů pro laboratorní přípravu směsí .....</b>	<b>15</b>
3.1	Chemické složení vstupních metakaolínů .....	15
3.2	Granulometrie.....	16
3.3	Spotřeba vody stanovením normální hustoty .....	17
3.4	Hodnota rozlití.....	18
3.5	Stanovení sypané hmotnosti.....	19
<b>4.</b>	<b>Návrh vhodné receptury betonu s obsahem metakaolínu .....</b>	<b>20</b>
4.1	Kamenivo .....	20
4.1.1	Sypaná hmotnost kameniva .....	20
4.1.2	Zrnitost kameniva .....	22
4.1.3	Tvarový index zrn hrubého kameniva.....	25
4.2	Cement .....	26
4.3	Voda .....	27
4.4	Metakaolín.....	27
4.5	Přísady .....	27
<b>5.</b>	<b>Studium vlivu metakaolínů na konzistenci cementové malty .....</b>	<b>29</b>
<b>6.</b>	<b>Stanovení vlastností čerstvého betonu.....</b>	<b>31</b>
6.1.	Složení použitých receptur betonu .....	31
6.2.	Zkouška čerstvého betonu rozlitím .....	32
6.3.	Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu .....	34
<b>7.</b>	<b>Stanovení vlastností ztvrdlého betonu.....</b>	<b>35</b>
7.1	Ošetřování zkušebních těles .....	35
7.2	Stanovení pevnosti betonu v prostém tlaku.....	35
<b>8.</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>38</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>41</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>44</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>45</b>

# 1. Úvod

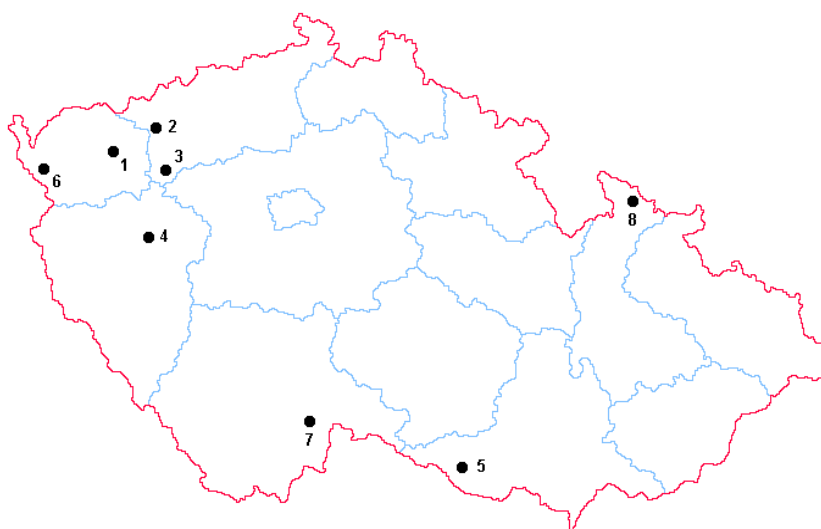
Z důvodu značné spotřeby betonu a tím i znečišťování ovzduší při výrobě slínku portlandského cementu vzniká značné množství oxidu uhličitého, čímž je výrazně zatíženo životní prostředí. S ohledem na tyto aspekty se snažíme výrobu cementů částečně nahradit jinými pucolány, méně zatěžující životní prostředí. Jelikož ani zásoby kameniva, jako plniva do betonů, nejsou nevyčerpatelné, snažíme se dosáhnout vyšších pevností a tím snížit velikost vyráběných betonových prvků. Nejen tyto důvody, ale také snížení energetické náročnosti a zvýšení trvanlivosti betonu se zabývá dnešní výzkum v oblasti technologie betonu a maltovin. Jednou s takových přísad je i metakaolín, kterým se budu zabývat v této bakalářské práci.

Díky dostatečným zásobám kaolínů v tuzemsku, se jejich výrobou zabývají především firmy Sedlecký kaolín, a. s. Božíčany, České lupkové závody, a.s. Nové Strašecí a dále také firma Keramost, a. s. Most. Cílem této bakalářské práce je zjistit vliv konzistenčních vlastností metakaolínů firmy Sedlecký kaolín, a.s. na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Stejně tak i porovnání metakaolínů I-META a S-META s vlastnostmi metakaolínů již používaných.

Bakalářská práce je rozdělena do šesti hlavních kapitol. Tyto kapitoly jsou systematicky rozděleny od spíše teoretické části k části praktické. V první z kapitol je nastíněn přehled způsobů průmyslové výroby metakaolínů a stručná sumarizace vlivu přídavku metakaolínu na vlastnosti cementu a betonu. Obsahem této kapitoly jsou nejen výrobní způsoby při výrobě, ale také například chemicko-technologické vlastnosti kaolínů dle oblasti těžby. Kapitola dvě se zabývá stanovením vlastností vstupních metakaolínů pro laboratorní přípravu směsí. Struktura kapitoly je členěna na dílčí podkapitoly dle časového plánu provádění jednotlivých zkoušek. V kapitolách tři až šest se již přechází spíše k praktické části této práce. Je zde zahrnut návrh vhodné receptury betonu s obsahem metakaolínu, dále stanovení vlastností čerstvého betonu a také příprava zkušebních betonových těles s náhradou cementu metakaolínem a stanovení základních vlastností a vlastností metakaolínů na konzistenci cementové malty. V závěru je uvedeno porovnání konzistence metakaolínů v suspenzi s vodou, s konzistencí čerstvého betonu s metakaolínem a vyhodnocení vlivu metakaolínu na konzistenci betonu.

## 2. Přehled způsobů průmyslové výroby metakaolínu a stručná sumarizace vlivu přísadky na vlastnosti cementu a betonu

Česká republika je významným producentem kaolínu a lupku. Obě tyto suroviny lze, vzhledem k jejich vysokému obsahu kaolinitu, využít k výrobě pucolánů na bázi metakaolinitu. Oblast s největší produkcí kaolínů v tuzemsku jsou ložiska v západních a jihozápadních Čechách a to především v oblasti Karlových Varů. Další výskyt kaolínů je zobrazen v následující mapě (viz. Obr. 1.)

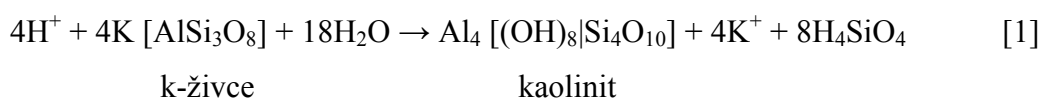


**Obr. 1.** Mapa výskytu kaolínů v ČR

Vysvětlivky k Obr. 1.: 1. Karlovarsko 2. Kadaňsko 3. Podbořansko 4. Plzeňsko 5. Znojemsko 6. Chebská pánev  
7. Třeboňská pánev 8. Vidnava

### 2.1 Suroviny pro výrobu a výroba metakaolínů

Výchozím materiálem pro vznik surového kaolínu jsou horniny bohaté na živce, při jejichž kaolinizaci v kyselém prostředí vzniká kaolín, jež se vyznačuje vysokým obsahem jílového minerálu kaolinitu. Rozklad draselného živce na kaolinit při pomalém průtoku vody zvětrávacím profilem lze schématicky vyjádřit rovnicí:



Těžená surovina obsahuje z 15 – 30 % kaolinit, zbytek tvoří křemen, nerozložené živce, slídy a akcesorie, představované např. těžkými minerály [19]. Chemicko-technologické vlastnosti vybraných jemnozrnných, středně hrubozrnných a hrubozrnných plavených kaolínů České republiky, vhodných pro výrobu metakaolínu jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 1, Tab. 2).

**Tab. 1:** Chemicko-technologické vlastnosti jemnozrnných plavených kaolínů [23]

Vlastnost kaolínu - vysušený vz. [hm. %]	Jemnozrnný kaolín		
	Karlovarsko SK Božičany	Podbořansko Kaolin Hlubany	Kadaňsko Keramost
<b>SiO<sub>2</sub></b>	45-55	50-60	47-58
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>36-38</b>	<b>32-34</b>	<b>35-37</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,7-1,9	0,5-0,8	0,9-1,7
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,1-0,8	0,4-0,5	0,4-0,6
<b>CaO</b>	0,1-0,3	0,1-0,2	0,1-0,2
<b>MgO</b>	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,7-1,8	0,4-0,8	1,3-1,7
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,01-0,1	0,01-0,02	0,01-0,06
<b>Ztráta žíháním</b>	<b>13,0-14,0</b>	<b>11,5-12,5</b>	<b>12,0-13,0</b>
<b>Obsah kaolinitu</b>	<b>85-95</b>	<b>80-90</b>	<b>85-90</b>
<b>Obsah slíd</b>	3-10	1-5	3-10
<b>Obsah křemene</b>	1-5	5-15	1-5
<b>Obsah částic pod 2 µm</b>	<b>55-70</b>	<b>40-55</b>	<b>50-60</b>

**Tab. 2:** Chemicko-technologické vlastnosti středně hrubozrnných a hrubozrnných plavených kaolínů [23]

Vlastnost kaolínu - vysušený vz. [hm. %]	Středně hrubozrnný až hrubozrnný kaolín			Jemnozrnný kaolín	Hrubozrnný jíl
	M	M3	U extra	MPO	P
<b>SiO<sub>2</sub></b>	51,1	47,0	49,6	45,3	75,0
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>34,1</b>	<b>35,6</b>	<b>33,1</b>	<b>35,7</b>	<b>14,7</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	1,1	1,6	1,6	<b>3,0</b>	<b>1,3</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,3	1,3	0,5	1,0	0,1
<b>CaO</b>	0,2	0,2	0,6	0,2	0,20
<b>MgO</b>	0,2	0,2	0,6	0,2	0,5
<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,9	1,0	2,7	<b>1,3</b>	<b>3,0</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,1	0,03	0,4	0,1	0,01
<b>Ztráta žíháním</b>	<b>11,0</b>	<b>13,0</b>	<b>10,9</b>	<b>13,2</b>	<b>5,2</b>
<b>Obsah kaolinitu</b>	<b>78</b>	<b>84</b>	<b>77</b>	<b>88</b>	<b>30</b>
<b>Obsah slíd</b>	15	12	9	9	5
<b>Obsah křemene, popř. živce</b>	7	4	14	3	65
<b>Obsah částic pod 2 µm</b>	<b>28</b>	<b>25</b>	<b>40</b>	<b>62</b>	<b>15</b>

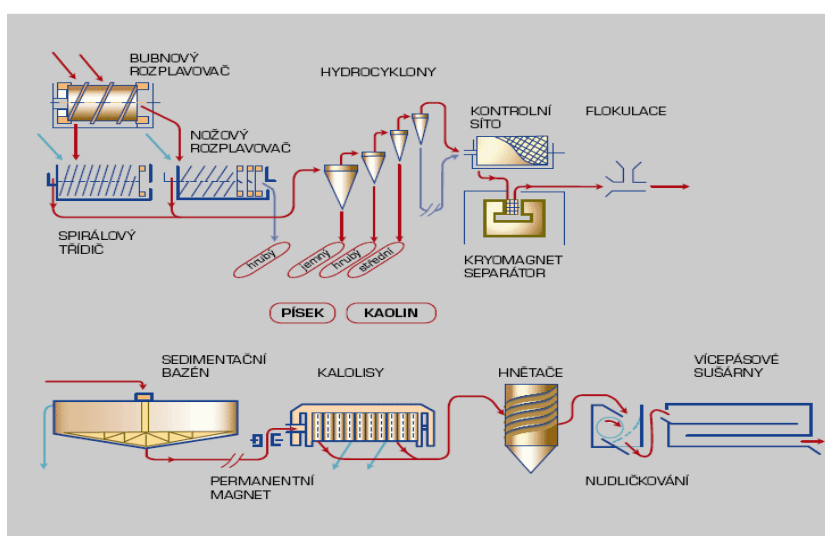


K získání surového kaolínu využíváme především možnost plavení, při které se z převážné části odstraňují cizorodé příměsi. Po následném odvodnění v kalolisech se kaolín protlačuje přes hnětač s kruhovými otvory. Vznikající nudličky (viz. Obr. 2.) se vysuší na vícepásových sušárnách (viz. Obr. 3.)



**Obr. 2.** Kaolín ve formě nudliček [19]

Kaolín můžeme také ohodnotit jako významnou horninu průmyslu a to při výrobě papíru, plastických hmot a skleněných vláken. Značné uplatnění má ovšem i při výrobě nátěrových hmot, v kosmetickém, tužkárenském a keramickém průmyslu. V keramickém průmyslu se jedná o výrobu porcelánu, určitých druhů keramiky a z části i při výrobě některých žáruvzdorných hmot.



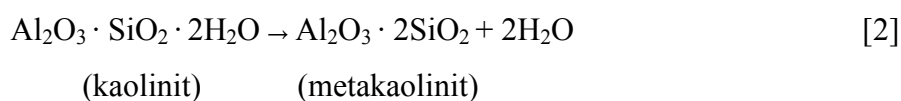
**Obr. 3.** Technologický postup výroby kaolínů [19]

Metakaolin je z kaolínu vyráběn kalcinací, tj. tepelným rozkladem. Kalcinace se provádí buď v rotačních pecích (Obr. 4), nebo ve fluidním loži. Známa je též tzv. mžiková kalcinace. Kromě rotačních pecí lze pro výrobu metakaolínu použít i zařízení známá z technologie keramiky, např. vozokomorové pece.



**Obr. 4.** Rotační pec ČLUZ [17]

Kalcinace kaolinitu začíná v laboratorních podmínkách přibližně při teplotách 450 °C. U provozní výroby metakaolínu se používá teplot vyšších, zpravidla v rozmezí 700 – 850 °C (Vavro, 2010, ústní sdělení), a to v závislosti na složení kaolínu, velikosti částic podobě vypalované suroviny (prášek, nudličky, cihelky). Důležitá, pro výslednou reaktivitu metakaolínu, je také doba výpalu. Při dosažení této teploty endotermně dehydratuje kaolinit na metakaolinit. Předešlý postup lze popsat následující zjednodušenou rovnicí:



Největšími světovými výrobci metakaolínů jsou např. ve Spojených státech amerických firmy Advanced Cement Technologies, LCC a Engelhard Corporation, v Evropě pak společnost Imerys, Ltd. z Velké Británie. K tuzemským nejznámějším výrobcům patří České lupkové závody, a. s., Nové Strašecí (ČLUZ), dále Sedlecký kaolín, a. s., Božičany a Keramost, a. s., Most.

## 2.2 Vliv přídavku metakaolínu na vlastnosti cementové malty a betonu

V současné době využíváme metakaolín ve stavebnictví jako náhradu portlandského cementu. Zpravidla je používáno množství 5 – 10 %, maximálně až 20 % z hmotnosti cementu. Přídavek metakaolínu na vlastnosti cementu a betonu je ovlivněn jeho druhem a množstvím. Metakaolíny působí na beton převážně pozitivně. Kladný vliv lze spatřovat hlavně v oblasti zvýšení pevnosti a zlepšení trvanlivosti betonu. Dalšími výraznými klady použití metakaolínů je potlačení objemové expanze a zjemnění pórové struktury.

Metakaolín v betonu ovšem může působit také negativně, a to hlavně na zpracovatelnost čerstvého betonu. Tato situace může nastat zejména při vyšších přídavech metakaolínu okolo 10 %, případně vyšších. Ovšem případným přídavkem, například vhodně zvoleného, superplastifikátoru do čerstvého betonu se dá toto zhoršení zpracovatelnosti odstranit.

Studiu vlivu metakaolínu na konzistenci čerstvého betonu je na katedře stavebních hmot a hornického stavitelství FAST VŠB-TU Ostrava věnována pozornost již od roku 2006. Např. Šafrata et al. [26] sledovali vliv různých tuzemských metakolínů z produkce firem ČLUZ, a. s. a Sedlecký kaolín, a. s. na vlastnosti HSC betonů. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 3 a Tab. 4.

**Tab. 3:** Porovnání konzistenčních vlastností testovaných metakaolínů [26]

Použitý metakaolín	Míra rozprostření		Spotřeba vody		Medián zrnitosti $x_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]
	Hodnota [mm]	Poznámka	Hodnota [%]	Poznámka	
<b>I META 4</b>	155	dobrá konzistence	70	při 72% dosti tekutý	4,26
<b>U META 6</b>	210	řidší konzistence	66	při 70% dosti tekutý	6,20
<b>Mefisto K05 (vzorek ze 8/2005)</b>	125	husté, bez bublin	75	poměrně hustý, při 65% nelze měřit	2,97
<b>Mefisto K05 (vzorek z 11/2005)</b>	> 350	velmi řídké, teče, nelze změřit	54	ještě při 60% vody je kaše úplně tekutá	7,18
<b>Mefisto K05 (vzorek z 2/2006)</b>	125	velmi husté, těžce zpracovatelné, lepí	86	ještě při 76% vody hrudkovité až sypké	3,67

**Tab. 4:** Základní vlastnosti čerstvých betonů [26]

<b>Záměs</b>	<b>Druh a množství příměsi</b>	<b>Objemová hmotnost [kg.m<sup>-3</sup>]</b>	<b>Konzistence rozlitím [mm]</b>	<b>Obsah vzduchu [%]</b>
<b>Z1</b>	0%	2620	360	1,2
<b>Z2</b>	10% metakaolínu I META 4	2580	580	0,7
<b>Z3</b>	10% metakaolínu U META 6	2590	420	1,0
<b>Z5</b>	10% metakaolínu Mefisto K05 (vzorek ze srpna 2005)	2610	580	1,2
<b>Z6</b>	10% metakaolínu Mefisto K05 (vzorek z listopadu 2005)	2620	510	1,3
<b>Z7</b>	10% metakaolínu Mefisto K05 (vzorek z února 2006)	2620	640	0,6

Jak vyplývá z Tab. 3 a Tab. 4, metakaolíny, které se samy o sobě v suspenzi s vodou velmi dobře roztékají (mají vysokou míru rozprostření), v betonu způsobují výrazné zhoršení konzistence. Naopak s metakaolíny, vyznačujícími se nízkou mírou rozprostření lze připravit betony s rozlitím v kategorii samozhutnitelných betonů. Ověření výše uvedených výsledků na dalších recepturách betonů se stalo hlavním impulsem pro předkládanou bakalářskou práci.

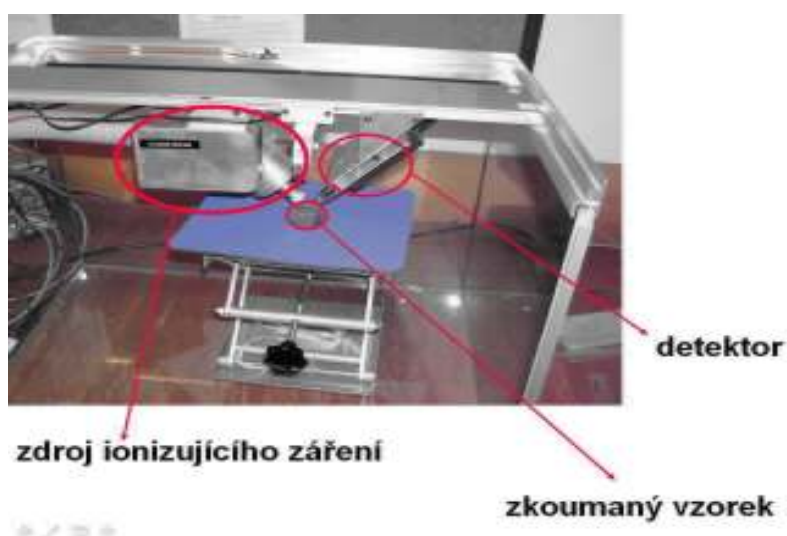
### 3. Stanovení vlastností vstupních metakaolínů pro laboratorní přípravu směsí

Na testovaných metakaolínech byly sledovány fyzikální vlastnosti, konkrétně sypná hmotnost, zrnitostní složení, hodnota rozlití (míra rozprostření) a spotřeba vody, stanovená pomocí zkoušky normální hustoty podle ČSN EN 196-3 [1]. Stanoveno bylo také chemické složení metakaolínů metodou RTG – fluorescence (XRFS).

Stanovení granulometrického složení a hodnoty rozlití, respektive míry rozprostření a také chemické složení bylo prováděno v laboratořích firmy Sedlecký kaolín, a.s. Zkoušky normální hustoty a stanovení sypné hmotnosti byly provedeny v laboratoři stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava.

#### 3.1 Chemické složení vstupních metakaolínů

Složení a procentuální zastoupení jednotlivých prvků (viz. Tab. 5) bylo provedeno pomocí RTG-fluorescenční analýzy. Tato zkouška slouží k určení chemického složení zkoumaných vzorků. Jedná se o metodu nedestruktivní, která nijak neovlivňuje zkoušený vzorek a díky tomu je i nejrozšířenější metodou využívající ionizační záření. Přístroj pro určení RTG-fluorescenční analýzy je zobrazen v Obr. 5 [25].



**Obr. 5.** Aparatura RTG-fluorescenční analýzy [25]

**Tab. 5:** Chemické složení metakaolínu [Příloha 3 a 4]

Parametr	Hodnota [%]	
	I-META 4	S-META 4
SiO <sub>2</sub>	52	53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41	43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9	1,0
TiO <sub>2</sub>	0,3	0,3
CaO	0,3	0,3
MgO	0,3	0,2
K <sub>2</sub> O	1,6	0,9
Na <sub>2</sub> O	0,01	0,04
Ztráta žíháním	1,8	1,1

### 3.2 Granulometrie

Granulometrie je základní vlastností ovlivňující reaktivitu metakaolínů. Zrnitostní složení metakaolínů bylo stanoveno na práškových vzorcích laserovým granulometrem RODOS v centrálních laboratořích firmy Sedlecký kaolín, a. s. v Božičanech. Hlavní výsledky zrnitostního rozboru jsou uvedeny v Tab. 6, v detailní podobě jsou pak prezentovány v Přílohách 5,7 a 9.

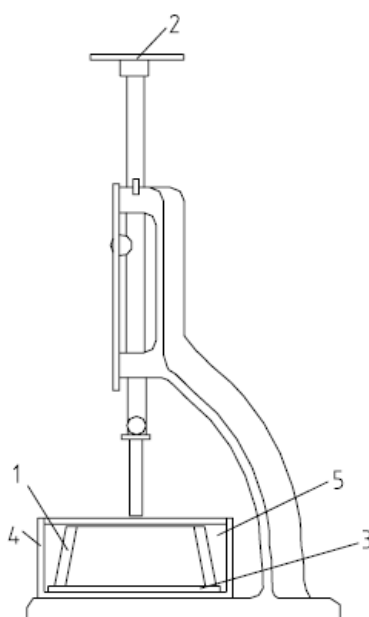
**Tab. 6:** Parametry zrnitosti a měrný povrch vstupních metakaolínů

Parametry zrnitosti	I-META 130	I-META 150	S-META
X <sub>10</sub> [μm]	1,22	1,22	1,25
X <sub>50</sub> [μm]	4,09	4,11	4,23
X <sub>99</sub> [μm]	9,34	9,60	9,98
Měrný povrch Sm [cm <sup>2</sup> /g]	6623,24	6588,29	6406,97

Pozn.: X<sub>50</sub> – medián zrnitosti.

### 3.3 Spotřeba vody stanovením normální hustoty

Stanovení normální hustoty (konzistence) metakaolínu se provádí pomocí ručního Vicatova přístroje s hustoměrným válečkem (viz. Obr. 6.). Postup zkoušky vychází z ustanovení ČSN EN 196-3 [1]. Připravíme si určité množství metakaolínu a vody. Vodu nalijeme do míchačky a vsypeme metakaolín. Míchání probíhá ve dvou cyklech a to po 90 sekundách s 15 sekundovou pauzou. Celková doba míchání tedy trvá 3 minuty. Po domíchání naplníme kužel z tvrzené pryže o průměru dolní strany  $(75 \pm 10)$  mm a horní strany 65-85 mm. Výška měřicího kužele je  $(40 \pm 0,2)$  mm.



**Obr. 6.** Vicatův přístroj s hustoměrným válečkem a pryžovým prstencem [18]

Vysvětlivky k Obr. 6.: **1.** prstenec z tvrzené pryže **2.** ploška pro přídavná závaží **3.** skleněná destička **4.** nádoba na vodu **5.** voda

Skleněnou destičku, na kterou postavíme pryžový kužel, natřeme lehce olejem a začneme kužel plnit metakaolínovou kaší. Po naplnění zarovnáme horní povrch metakaolínové kaše v prstenci a vložíme pod hustoměrný váleček tak, aby metakaolínová kaše lícovala s plochou válečku. Kužel je umístěn pod hladinou vody. Po odjištění aretačního šroubu dojde k vniknutí zkušebního tělesa do metakaolínové kaše a zkoušku opakujeme až do doby, než hustoměrný váleček dosáhne vzdálenosti  $(6 \pm 2)$  mm od skleněné destičky.

### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Výsledný vodní součinitel je poměr množství vody k metakaolínu zaokrouhlený na 0,5 %. Jednotlivé výsledky vstupních metakaolínů jsou uvedeny v Tab. 7.

**Tab. 7:** Vodní součinitelé jednotlivých vstupních metakaolínů

Název metakaolínu	Spotřeba vody	
	Hodnota [%]	Poznámka
I-META 130	68	při 74% dosti tekutý
I-META 150	69	při 75% dosti tekutý
S-META	72	poměrně hustý, při 67% nelze měřit

### 3.4 Hodnota rozlití

Míra rozprostření (hodnota rozlití), byla prováděna v centrálních laboratořích firmy Sedlecký kaolín, a. s. Výsledky zkoušky jsou vyjádřeny v Tab. 8. Míra rozprostření je jednou ze stěžejních hodnot, získaných pro experimentální část této bakalářské práce. Podstatou této zkoušky je příprava suspenze metakaolínu a vody v poměru blízkém 1 : 1 a zjištění velikosti rozlitého kužele, naplněného připravenou suspenzí.

**Tab. 8:** Hodnota rozlití [19]

Název metakaolínu	Hodnota rozlití [mm]
I-META 130	130
I-META 150	150
S-META	230

Hodnoty rozlití metakaolínu v suspenzi s vodou jsou porovnány s hodnotami rozlití čerstvého betonu s přídatkem metakaolínu v kapitole 8.



### 3.5 Stanovení sypné hmotnosti

Sypná hmotnost metakaolínu je stanovena normou ČSN EN 196-3 [1]. Jedná se o hmotnost metakaolínů s dutinami, póry a mezerami mezi zrny. Vysušený metakaolín pro stanovení sypné hmotnosti plníme do prázdné nádoby o známé hmotnosti  $m_1$  z výšky 50 mm. Po naplnění nádoby odstraníme z jejího horního okraje přebytečný metakaolín. Naplněnou nádobku zvážíme  $m_2$ .

#### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Sypná hmotnost  $\rho_b$  se vypočítá podle vztahu:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [Mg.m}^{-3}\text{]} \quad [3]$$

kde:  $m_1$  – hmotnost prázdné nádoby [kg],  
 $m_2$  – hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg],  
 $V$  – objem nádoby [dm<sup>3</sup>].

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 9).

**Tab. 9:** Sypná hmotnost

Název metakaolínu	Sypná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
I-META 130	390
I-META 150	390
S-META	380

## **4. Návrh vhodné receptury betonu s obsahem metakaolínu**

Při návrhu konkrétní betonové směsi zohledňujeme především požadavky na stupeň agresivity vnějšího prostředí a dále také požadovanou pevnost betonu, vodotěsnost a mrazuvzdornost. Dalšími aspekty ovlivňujícími výběr složek betonu je jeho ekonomičnost a vliv na životní prostředí [24]. Z důvodu značné ekonomické náročnosti při výrobě slínku a také vlivu na životní prostředí při jeho výrobě, snažíme se tento prvek (slínek) nahradit jinými, méně náročnými, materiály, jako je např. metakaolín použitý v této práci.

### **4.1 Kamenivo**

Kamenivo je přírodní nebo umělá, anorganická, zrnitá látka určená převážně pro stavební účely do velikosti zrna 125 mm. Tvoří pevnou kostru v betonu v určitém poměru velikosti zrn. Použití kameniva do betonu upravuje technická norma ČSN EN 12620 [15].

Kamenivo použité v této práci je pro obě receptury betonu frakce 0/4 z těžebny Tovačov. Jedná se o drobné kamenivo (štěrkopísek) těžené společností Českomoravský štěrk, a. s. U hrubých frakcí 4/8 a 8/16 bylo pro beton nižší pevnosti použito kamenivo z lomu Hrabůvka patřící rovněž společnosti Českomoravský štěrk, a. s. Jde o drcenou moravskou drobu, která se vyznačuje značnou tvrdostí. V případě vysokopevnostního betonu byl zvolen drcený čedič z lomu Bílčice u Bruntálu, který patří společnosti Kamenolomy ČR, s.r.o. Toto kamenivo je díky svým vlastnostem předurčeno k použití do vysokopevnostních betonů.

#### **4.1.1 Sypná hmotnost kameniva**

Jedná se o hmotnost kameniva i s dutinami, póry a mezerami mezi nimi, jejíž stanovení uvádí norma ČSN EN 1097-3 [8]. Sypnou hmotnost provádíme dvěma způsoby a to u volně sypaného kameniva a u kameniva setřeseného.

Kamenivo pro sypnou hmotnost vysušeného, volně sypaného kameniva plníme z výšky 50 mm do prázdné nádoby o známé hmotnosti  $m_1$ . Odstraníme přebytečné kamenivo z horního okraje, který následně zarovnáme a naplněnou nádobu zvážíme  $m_2$ .

U sypné hmotnosti vysušeného setřeseného kameniva je nutno uvést způsob hutnění. V našem případě se jednalo o hutnění na vibračním stolku a to po dobu zhruba 3 minuty. Zváženou prázdnou nádobu  $m_1$  musíme při setřásání dosypávat. Horní povrch nádoby opět zarovnáme a nádobu i s kamenivem zvážíme  $m_2$ .

### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Sypná hmotnost  $\rho_b$  se vypočítá podle vztahu:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [Mg.m}^{-3}\text{]} \quad [4]$$

kde:  $m_1$  – hmotnost prázdné nádoby [kg],

$m_2$  – hmotnost nádoby se zkušební navážkou [kg],

$V$  – objem nádoby [dm<sup>3</sup>].

Výsledné hodnoty zaokrouhlená na dvě desetinná místa jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 10, Tab. 11).

**Tab. 10.** Sypná hmotnost volně sypaného kameniva

Frakce	Objem nádoby [cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost kameniva v nádobě [g]	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva [Mg.m <sup>-3</sup> ]
0/4	3175	4970	1,56
4/8	3175	4911	1,55
8/16	3175	4810	1,52

**Tab. 11.** Sypná hmotnost setřeseného kameniva

Frakce	Objem nádoby [cm <sup>3</sup> ]	Hmotnost kameniva v nádobě [g]	Sypná hmotnost setřeseného kameniva [Mg.m <sup>-3</sup> ]
0/4	3175	5583	1,76
4/8	3175	5505	1,73
8/16	3175	5347	1,68

#### 4.1.2 Zrnitost kameniva

Nejčastějším vyjádřením zrnitosti kameniva je síťový rozbor, který určuje norma ČSN EN 933-1, 2 [3, 4]. Jde o určení podílů zrn propadlých dílčím sítím.

Kamenivo se z počátku zbaví jemných částic a to pomocí promývání. Zkušební navážku zvážíme  $M_1$  a zcela ponoříme na 24 hodin do vody. Po vyndání z vodní lázně se kamenivo propírá zkušebním sítím o velikosti ok 0,063 mm chráněným sítím o velikosti ok 1 nebo 2 mm do doby, než sítím protéká čistá voda. Zůstatek na síti 0,063 mm se vysuší při teplotě  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  do ustálení hmotnosti. Poté se zvážení zjistí jeho hmotnost  $M_2$ .

Na sestavený sloupec sítí o velikosti ok 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16; 32 mm [4] nasypeme probrané a vysušené kamenivo. Horní síť se uzavře víkem a upevní přítlačnou deskou prosévacího přístroje. Prosévání se ukončí, pokud se zůstatky na sítích nemění o více než 1%. Po ukončení zkušebního cyklu se ukončí prosévání manuálně. Jednotlivé váhy zůstatků  $P$  na sítích se znázorňují graficky pomocí křivky zrnitosti.

#### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Procentuální podíl jemných částic  $f$ , které propadly sítím o velikosti ok 0,063 mm se vypočte dle vztahu:

$$f = \frac{M_1 - M_2}{M_1} + P \cdot 100 \quad [\%] \quad [5]$$

kde:  $M_1$  – hmotnost vysušené zkušební navážky [kg],

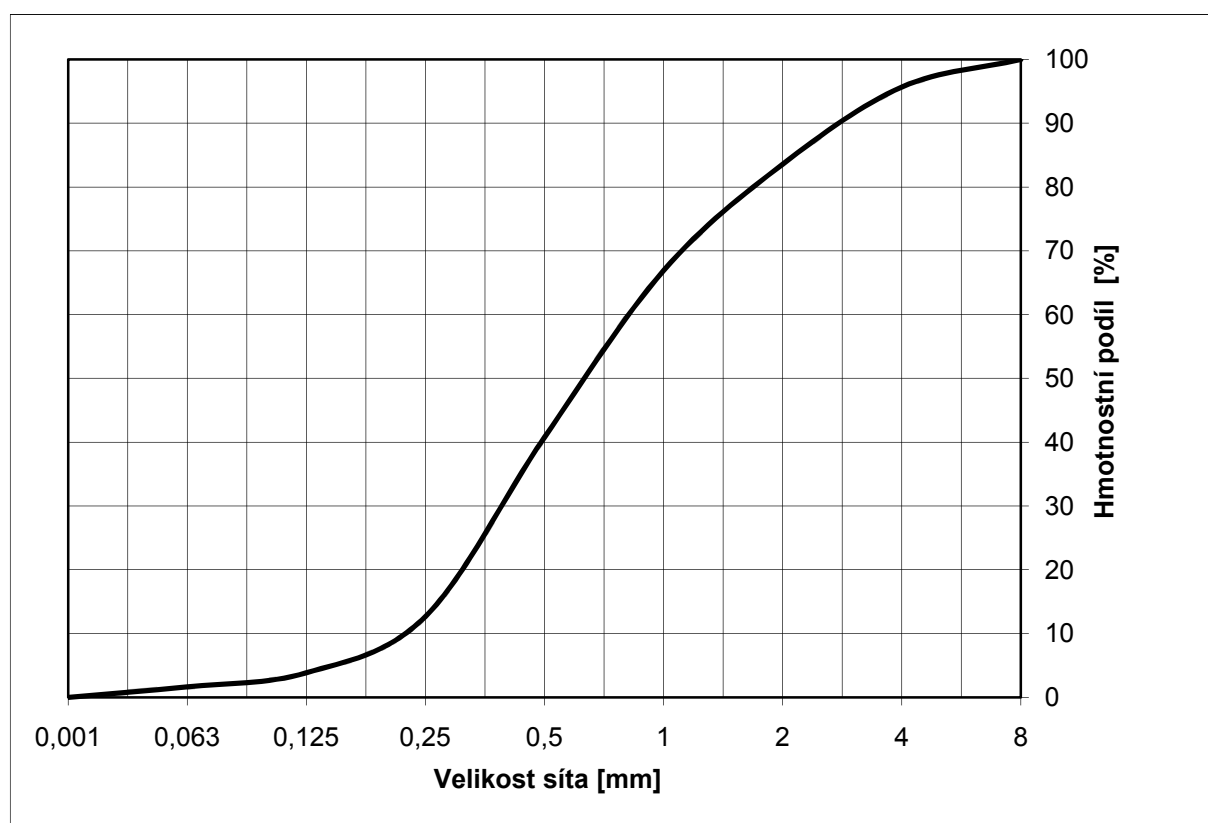
$M_2$  – hmotnost vysušeného zůstatku na síti 0,063 mm [kg],

$P$  – hmotnost propadu jemných částic na dně [kg].

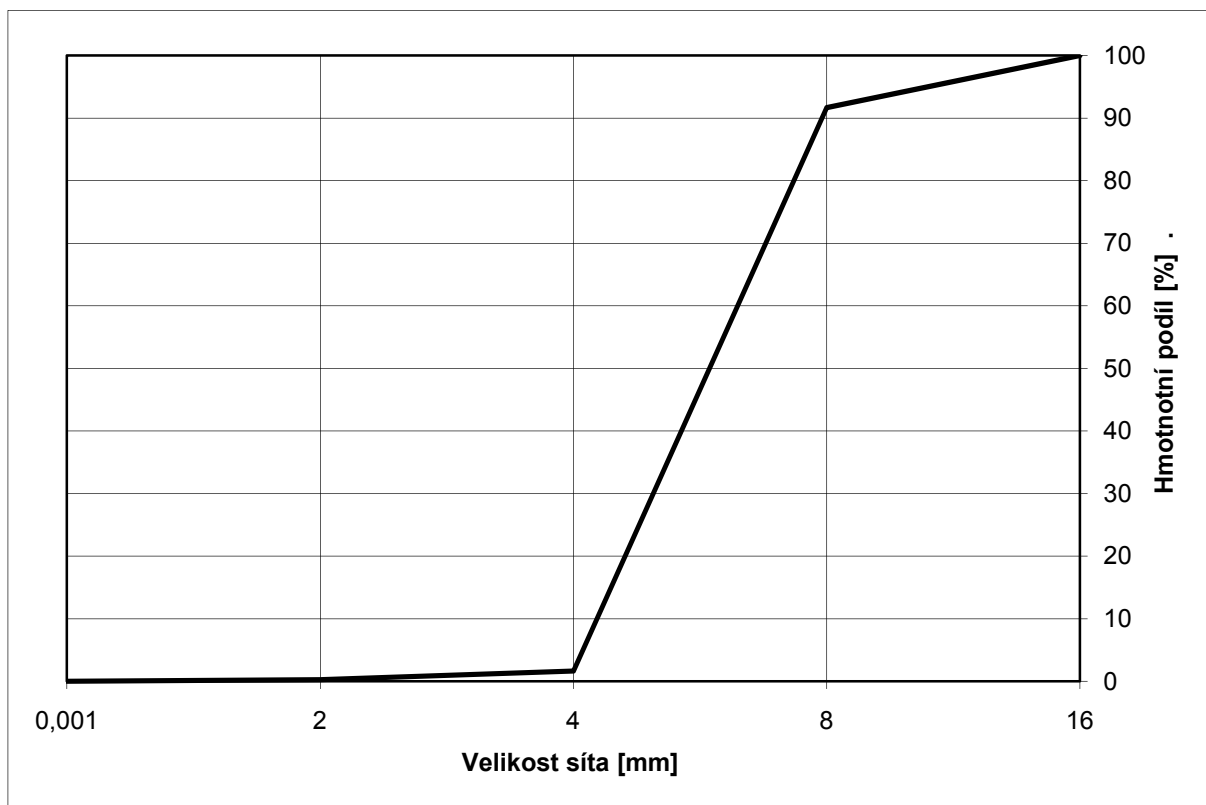
Výsledné hodnoty síťového rozboru jsou vyjádřeny v Tab. 12 a křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva pak v Obr. 7 až Obr. 9.

**Tab. 12.** Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva

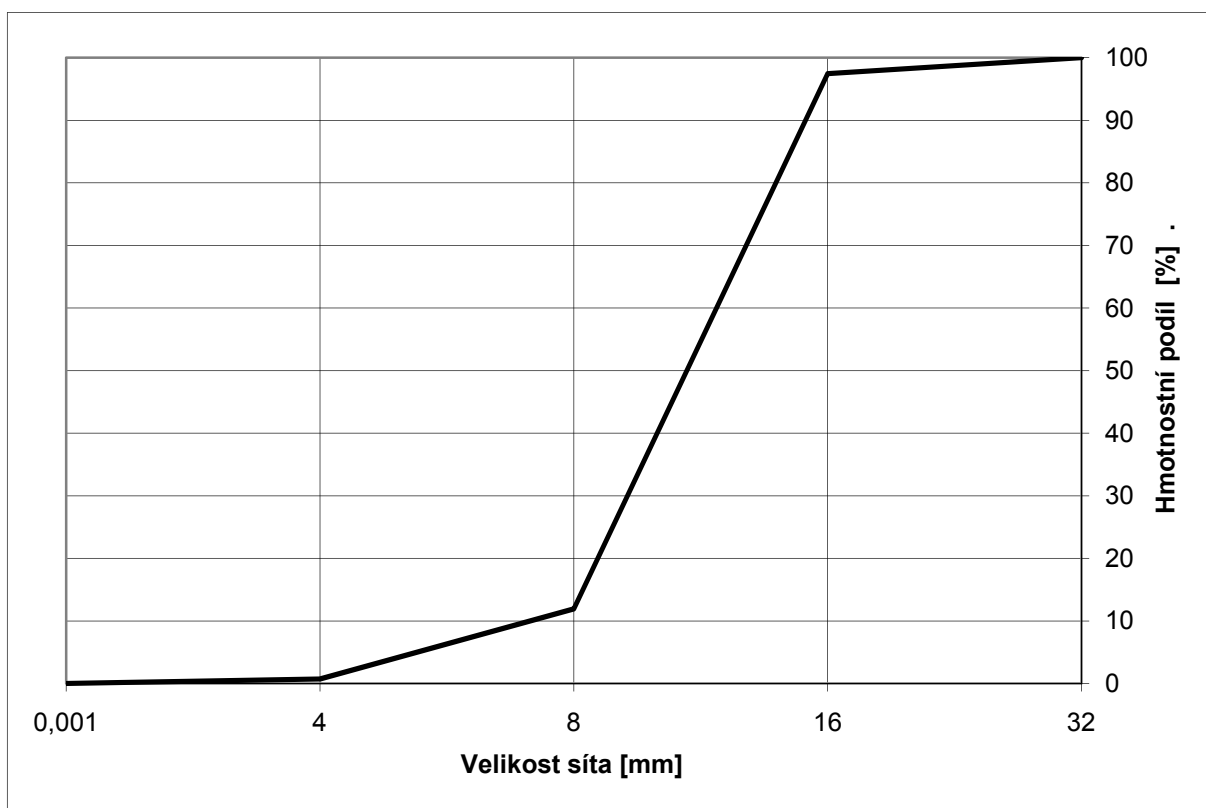
Frakce	Velikost [mm]	0	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	Σ
0/4	zůstatek na sítě [g]	15,0	19,7	79,4	252,9	235,1	150,1	108,7	39,1	0	-	-	900,0
4/8		2,5	-	-	-	-	-	13,7	900,5	83,1	0	-	999,8
8/16		21,1	-	-	-	-	-	-	336,2	2565,4	77,3	0	3000
0/4	poměrné zastoupení [%]	1,7	2,2	8,8	28,1	26,1	16,7	12,1	4,3	-	-	-	100
4/8		0,3	-	-	-	-	-	1,4	90,0	8,3	-	-	100
8/16		0,7	-	-	-	-	-	-	11,2	85,5	2,6	-	100
0/4	propad sítím [%]	0	1,7	3,9	12,7	40,8	66,9	83,6	95,7	100	-	-	-
4/8		0	-	-	-	-	-	0,3	1,7	91,7	100	-	-
8/16		0	-	-	-	-	-	-	0,7	11,9	97,4	100	-



**Obr. 7.** Křivka zrnitosti pro kamenivo Tovačov frakce 0/4



**Obr. 8.** Křivka zrnitosti pro kamenivo Bílčice frakce 4/8



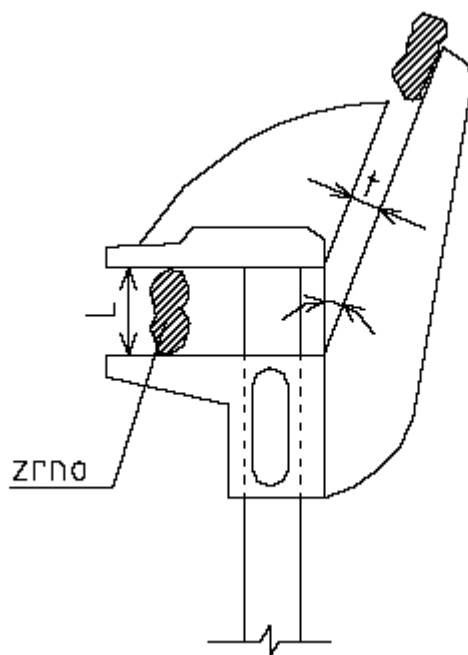
**Obr. 9.** Křivka zrnitosti pro kamenivo Bílčice frakce 8/16

#### 4.1.3 Tvarový index zrn hrubého kameniva

U tvarového indexu zrn se posuzují kameniva o velikosti zrn nad 4 mm. Jde o hmotnostní podíl zrn, jejichž poměr rozměrů  $L$  (délka zrna)/  $E$  (tloušťka zrna) je větší než 3. Stanovení tvarového indexu upravuje norma ČSN EN 933 – 4 [5].

Zkušební navážka kameniva se vysuší při teplotě  $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$  a proseje se příslušnými sítmi. Poté se odeberou pouze zrna příslušné frakce a zváží se  $M_1$ . Dvoučelistovým posuvným měřítkem (viz. Obr. 10.) se zjistí délka  $L$  a tloušťka  $E$  jednotlivých zrn. Zrna v poměru  $L/E$  větším než 3 se nazývají nekubická. Zrna nekubického tvaru zvážíme a tím zjistíme jejich hmotnost  $M_2$ .

Tvarový index byl stanovován na frakcích 4/8 a 8/16 čedičového kameniva z lomu Bílčice.



**Obr. 10.** Dvoučelistové posuvné měřidlo pro stanovení tvarového indexu zrn [18]

### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Procentuální vyjádření tvarového indexu SI se vypočte dle vztahu:

$$SI = \frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \quad [-] \quad [6]$$

kde:  $M_1$  – hmotnost zkušební navážky [g],

$M_2$  – hmotnost nekubických zrn [g].

Výsledky tvarového indexu zrn jsou vyjádřeny v Tab. 13.

**Tab. 13:** Tvarový index zrn hrubého kameniva z lomu Bílčice

Frakce	$M_1$ [g]	$M_2$ [g]	SI [-]
4/8	200	10,3	5
8/16	1000	31,7	3

## 4.2 Cement

Cement je spolu s kamenivem a vodou základní složkou při výrobě betonu. Plní v něm funkci pojiva. Jedná se o jemně mletou anorganickou látku, jež po smíchání s vodou hydratuje (tuhne a tvrdne). Použití cementů do betonů určuje norma ČSN EN 197-1 [2].

Pro beton nižší pevnosti se použil cement CEM II B/S 32,5 R, pro vysokopevnostní beton pak cement CEM I 42,5 R. Oba cementy pochází z výrobní linky společnosti Cement Hranice a.s. V tomto závodě se vyrábějí cementy portlandské, portlandské směsné se struskou nebo s vápencem.

Technické listy obou použitých cementů jsou uvedeny v Přílohách 1 a 2.



### **4.3 Voda**

Vodu do betonu rozdělujeme dle její funkce v betonu na vodu hydratační (potřebná k hydrataci cementu) a vodu reologickou (udržení tvárného čerstvého betonu). Dle technologie vodu dělíme na záměsovou (dodávaná při míchání betonu) a vodu ošetrovací (udržení betonu ve vlhkém stavu po zatuhnutí). Použitelnost vody do betonu je definována v technické normě ČSN EN 1008 [7].

V recepturách této práce je použita pitná voda z vodovodního řádu. Pitnou vodu můžeme do betonů použít vždy, bez vykonání jakýchkoli zkoušek.

### **4.4 Metakaolín**

Metakaolíny se v dnešní době používají převážně jako náhrada cementu a pro zlepšení mechanických, fyzikálních a trvanlivostních vlastností ztvrdlého betonu. Stanovení vlastností vstupních metakaolínů je podrobněji popsáno v kapitole 3. V této bakalářské práci byly použity tři druhy metakaolínů. Jedná se o produkty firmy Sedlecký kaolin, a.s. Dva z těchto produktů mají označení I-META s odlišnou mírou rozprostření a třetí má výrobní název S-META. Výrobní procedury a vliv metakaolínů na vlastnosti cementu a betonu jsou uvedeny v kapitole 2.

### **4.5 Přísady**

Přísady jsou chemické látky použité za účelem změn vlastností betonu. Po přidání přísad vznikají v betonu fyzikálně-chemické reakce ovlivňující především příznivě vlastnosti betonu. Z převážné části jde o látky tekuté, ale mohou být i práškové. Jejich množství je ovlivněno množstvím cementu a to do maximální hmotnosti cementu 5%. Typy přísad a použití je zahrnuto v normě ČSN EN 934 [6].

Vlastní použité přísady v této bakalářské práci jsou pro beton nižší pevnosti a vysokopevnostní beton značně odlišné a to jak typem, tak i jejich množstvím. Pro přípravu

betonu nižší pevnosti byla použita plastifikační přísada Woerment FM 787 a provzdušňující přísada Mikroporan (LP). U vysokopevnostního betonu jsme pro dosažení vysokých pevností použili superplastifikační přísadu Woerment FM 794 na bázi polykarboxylátů a dále také přísadu zpomalující tuhnutí Lenthane VZ 33 na bázi sacharózy. Procentuální množství použitých přísad z hmotnosti cementu jsou popsány v tabulkách této kapitoly (viz. Tab. 15, Tab. 16).

Technické listy použitých přísad jsou uvedeny v Přílohách 11-14. Přísady pocházejí z firem BASF Stavební hmoty Česká republika, s. r. o. [16] a ze společnosti Stachema Kolín, spol. s. r. o. [20].

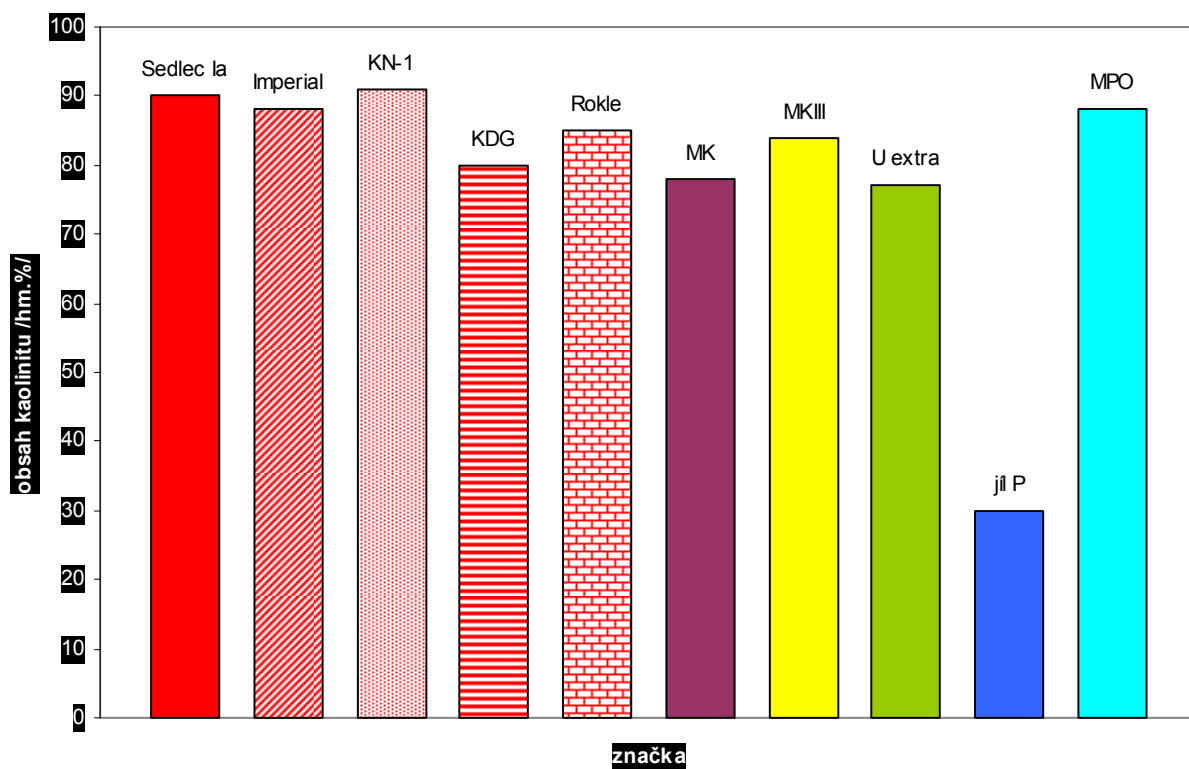
## 5. Studium vlivu metakaolínů na konzistenci cementové malty

Před samotným studiem vlivu vybraných metakaolínů na konzistenci betonů byl tento vliv sledován na cementové maltě. Zvoleny byly zcela nové typy metakaolínů, které ještě nejsou společností Sedlecký kaolín, a. s. komerčně nabízeny na trhu. Základní parametry těchto zrnitostně nových typů metakaolínů jsou uvedeny v Tab. 2 v podkap. 2.1 této práce. Cementová malta byla připravena v laboratořích FAST VŠB-TU Ostrava. K přípravě cementové malty bylo použito 450 g CEM I 52,5 R, 45 g metakaolínu, 225 g (resp. 250 g) vody a 1350 g normového písku. Výsledky konzistence připravené malty uvádí Tab. 14.

**Tab. 14:** Konzistenční vlastnosti cementové malty s 10 % vybraných metakaolínů

Metakaolín	Míra rozlití s vodou [mm]	Cementová malta [mm]	
		225 g vody	250 g vody
<b>MPO META</b>	160	142,5	167,5
<b>M META</b>	320	117,5	165,5
<b>M3 META</b>	250	131,0	141,5
<b>P META</b>	<b>400</b>	<b>117,0</b>	154,0
<b>Referenční směs bez metakaolínu</b>	-	152,5	175,0

Středně hrubozrnný až hrubozrnný kaolín a jíł (obvykle frakce 20 až 63  $\mu\text{m}$ , u jíłů až 100  $\mu\text{m}$ ) je základní surovinou těchto metakaolínů. Mineralogicky se vstupní suroviny vyznačují sníženým obsahem kaolinitu v důsledku zvýšeného množství jemných částic slíd, křemene, živce a dalších (viz. Obr. 11.) [23]. I když se jedná o kvalitativně odlišné vstupní suroviny, tak i za těchto podmínek dosahují provozně připravené metakaolíny typu MPO META a M3 META některých srovnatelných parametrů (pevnosti cementové malty) s nejkvalitnějšími tuzemskými metakaolíny, např. N META 2 .



**Obr. 11.** Obsah kaolinitu v hrubozrnných až střednězrnných kaolínech [23]

Jak je zřejmé z naměřených hodnot v Tab. 14, tak mezi konzistencí metakaolínu s vodou (mírou rozprostření) a konzistencí cementové malty platí „nepřímá úměrnost“. Toto zjištění potvrdilo závěry Šafraty a kol. [26] a stalo se základem pro experimentální část bakalářské práce.

## 6. Stanovení vlastností čerstvého betonu

Za čerstvý beton považujeme beton zhutnitelný a zpracovatelný v určité době. Tohoto se dosahuje zvolením vhodných receptur. Snažíme se proto eliminovat faktory snižující potřebné vlastnosti a to kontrolou základními zkouškami čerstvého betonu. Jednou ze základních zkoušek čerstvého betonu je jeho konzistence, ovlivňující přepravu a hutnění a dále jeho objemová hmotnost a obsah vzduchu.

### 6.1 Složení použitých receptur betonů

V této práci byly testovány dvě odlišné receptury betonu, které se lišily jak složením, tak i jejich následným použitím. Jedná se o recepturu betonu nižší pevnosti (dále značenou  $Z_1$ ) a recepturu vysokopevnostního betonu (dále značenou  $Z_2$ ). Složení testovaných receptur uvádějí následující tabulky (Tab. 15, Tab. 16).

**Tab. 15:** Složení receptury  $Z_1$  [kg]

Název příměsi	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
<b>CEM II B/S 32,5 R</b>	320	304	304	304
<b>Kamenivo 0/4 Tovačov</b>	850	850	850	850
<b>Kamenivo 4/8 Hrabůvka</b>	175	175	175	175
<b>Kamenivo 8/16 Hrabůvka</b>	765	765	765	765
<b>Voda</b>	184	184	184	184
<b>Plastifikátor FM 787 0,7% z cementu</b>	2,25	2,25	2,25	2,25
<b>Provdzušnovalo mikroporitan (LP) 0,1% z cementu</b>	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Příměs</b>	-	16	16	16

**Tab. 16:** Složení receptury Z<sub>2</sub> [kg]

Název příměsi	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
<b>CEM I 42,5 R</b>	480	480	480	480
<b>Kamenivo 0/4 Tovačov</b>	654	638	638	638
<b>Kamenivo 4/8 Bílčice</b>	251	245	245	245
<b>Kamenivo 8/16 Bílčice</b>	1034	1009	1009	1009
<b>Voda</b>	138	138	138	138
<b>Plastifikátor FM 794 2,5% z cementu</b>	12,00	12,18	12,18	12,18
<b>Zpomalovač Lentan VZ 33 0,8% z cementu</b>	3,84	3,9	3,9	3,9
<b>Příměs</b>	-	24	24	24

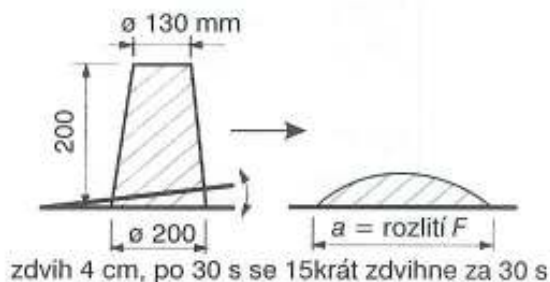
## 6.2 Zkouška čerstvého betonu rozlitím

Zkouška rozlitím je vhodná pro betony do maximálního zrna kameniva 63 mm. Před zkoušením se navlhčí jak forma, do které se čerstvý beton plní, tak i setřásací stolek, jež je spolu s formou a dřevěným dusadlem základní částí zkoušky. Setřásací stolek je rozměrů  $(700 \pm 2)$  mm x  $(700 \pm 2)$  mm a s omezením zdvihu na  $(40 \pm 1)$  mm. Formu umístíme na vyznačený střed horní desky stolku a polohu udržujeme pomocí přišlápnutí. Formu naplníme ve dvou vrstvách a každou z vrstev hutníme deseti rázy dřevěným dusadlem. Horní povrch formy zarovnáme s okrajem formy a formu zvedáme zhruba po 30 s od naplnění. Horní desku zvedneme a necháme volně padat na spodní desku a to po dobu 2 až 5 s. Tento postup opakujeme 15krát. Následně metrem změříme největší rozměr rozlití a to ve dvou, na sebe kolmých směrech  $d_1$  a  $d_2$  (viz Obr. 12.).

Rozlití (graf), ČSN EN 12350 - 5, označení F (= Flowtest)

F1 <sup>*)</sup>	≤ 340 mm
F2	350–410 mm
F3	420–480 mm
F4	490–550 mm
F5	560–620 mm
F6 <sup>*)</sup>	≥ 630 mm

zaokrouhleno na 10 mm



**Obr. 12.** Zkouška rozlití dle ČSN EN 12350-5 [10]

### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Hodnota rozlití je průměrná hodnota vypočtená z obou dílčích měření zaokrouhlená na 10 mm dle vzorce:

$$\text{Rozlití} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad [mm] \quad [7]$$

Po zhotovení zkoušky rozlitím nesmí kamenivo segregovat (oddělovat se od cementové kaše), jinak je zkouška neplatná. Výsledky jednotlivých hodnot rozlití jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 17, Tab. 18).

**Tab. 17:** Hodnoty rozlití pro recepturu Z<sub>1</sub> [mm]

Název příměsí	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
<b>Rozlití</b>	410	390	380	370

Pozn.: Naměřené hodnoty jsou průměrovány ze tří dílčích měření.

**Tab. 18:** Hodnoty rozlití pro recepturu Z<sub>2</sub> [mm]

Název příměsí	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
<b>Rozlití</b>	490	460	460	400

Pozn.: Naměřené hodnoty jsou průměrovány ze tří dílčích měření.

### 6.3 Zkouška objemové hmotnosti čerstvého betonu

Čerstvý beton zhutníme v tuhé vodotěsné nádobě známého objemu  $V$  (objem včetně pórů a trhlin) a známé hmotnosti  $m_1$ . Hutnění provádíme pevným přitlačením k vibračnímu stolu na určitou dobu, ale ne dlouho, aby nedošlo k rozmíslení směsi. Po zarovnání formy ocelovým hladítkem a jejím očištění formu zvážíme i se zhutněným betonem  $m_2$ .

#### Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:

Výpočet objemové hmotnosti  $D$  dle ČSN EN 12350-6 [11] zaokrouhlíme na nejbližších  $10 \text{ kg/m}^3$  a určíme dle vztahu:

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad [8]$$

kde:  $m_1$  je hmotnost prázdné nádoby [kg],

$m_2$  je hmotnost naplněné nádoby [kg],

$V$  je skutečný objem nádoby [ $\text{m}^3$ ],

$D$  je objemová hmotnost čerstvého betonu [ $\text{kg/m}^3$ ].

Výsledky objemových hmotností jsou průměrovány ze tří hodnot naměřených na odlišných vzorcích a uvedeny v tabulkách (Tab. 19, Tab. 20)

**Tab. 19:** Objemové hmotnosti pro recepturu  $Z_1$  [ $\text{kg/m}^3$ ]

Název příměsi	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
Objemová hmotnost	2290	2260	2200	2190

**Tab. 20:** Objemové hmotnosti pro recepturu  $Z_2$  [ $\text{kg/m}^3$ ]

Název příměsi	0% přídavek metakaolínu	5% přídavek metakaolínu I-META 130	5% přídavek metakaolínu I-META 150	5% přídavek metakaolínu S-META
Objemová hmotnost	2630	2600	2590	2610



## **7. Stanovení vlastností ztvrdlého betonu**

Jedním z cílů této bakalářské práce je stanovení pevností ztvrdlého betonu zkoušených druhů záměsí a to jak po 7, tak především po 28 dnech. Naměřené hodnoty jsou parametry pevností ztvrdlého betonu v prostém tlaku. Veškeré zkoušky ztvrdlého i čerstvého betonu (viz. kapitola 6) byly prováděny v laboratoři stavebních hmot FAST VŠB-TU Ostrava.

### **7.1 Ošetřování zkušebních těles**

Po provedení zkoušek čerstvého betonu je důležité ošetřování vyrobených zkušebních těles. Ošetřování začíná již při plnění zkušebních forem před hutněním a to olejovým nátěrem v důsledku snazšího odformování. Po zhutnění se formy s betonem přikryjí igelitovými pytli a nechají 24 hodin tvrdnout. Po odformování se zkušební tělesa nesmazatelně popíší a vloží do vodní lázně, kde se nechají až do provádění zkoušek [12].

### **7.2 Stanovení pevnosti betonu v prostém tlaku**

Stanovení pevnosti zkušebních těles bylo prováděno na krychlích o rozměrech 150x150x150 mm. Zkouška probíhala v lisu kalibrovaném 10. 3. 2010 za teploty 26°C a vlhkosti vzduchu 55%. Zkoušky byly prováděny po 7 a 28 dnech od naplnění forem.

Zkušební tělesa se nejprve vyjmou z vodní lázně, povrchově osušily a změřily rozměry pro výpočet průřezové plochy tělesa  $A_c$ . Následně se očistily dotykové plochy desek lisu a odstranily se všechny přebytečné zbytky písku na plochách, které přilnou k tlačným deskám lisu. Krychle se umístí do středu tlačných desek a zatěžují se kolmo na směr plnění do forem silou  $F$ . Zatěžování probíhá konstantní rychlostí 0,2 MPa/s bez nárazů.

#### **Vlastní výpočet a vyjádření výsledků:**

Pevnost v prostém tlaku  $f_c$  je dána následujícím vztahem dle ČSN EN 12390-3 [13]

a zaokrouhlena na nejbližších 0,5 MPa:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad [\text{MPa}] \quad [9]$$

kde: F – nejvyšší zatížení při porušení tělesa [kN],

$A_c$  – průřezová plocha vzorku [ $\text{mm}^2$ ], na kterou působí zatížení v tlaku.

Vyhodnocení výsledků jednotlivých záměsů jsou zaznamenány v níže uvedených tabulkách (Tab. 21 až Tab. 24).

**Tab. 21:** Pevnost v prostém tlaku po 7 dnech u receptury  $Z_1$

Název příměsi	Označení vzorku	Rozměry [mm]		Plocha $A_c$ [ $\text{mm}^2$ ]	Síla F [kN]	$f_c$ [MPa]	$\bar{f}_c$ [MPa]
<b>0% přídavek metakaolínu</b>	1	148,03	149,39	22114	336,03	15,0	15,5
	2	149,61	147,93	22132	350,33	16,0	
	3	149,35	148,38	22161	346,20	15,5	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 130</b>	1	147,03	149,33	21956	397,33	18,0	18,0
	2	147,83	149,34	22077	399,88	18,0	
	3	149,49	148,00	22125	398,58	18,0	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 150</b>	1	148,57	149,45	22204	417,90	19,0	19,0
	2	149,93	149,54	21972	391,06	17,5	
	3	146,49	149,5	21900	442,05	20,0	
<b>5% přídavek metakaolínu S-META</b>	1	146,33	149,44	21868	385,17	17,5	18,5
	2	145,82	149,42	21788	424,12	19,5	
	3	146,78	149,55	21951	404,69	18,5	

**Tab. 22:** Pevnost v prostém tlaku po 28 dnech u receptury Z<sub>1</sub>

Název příměsi	Označení vzorku	Rozměry [mm]		Plocha A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Síla F [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	Ø f <sub>c</sub> [MPa]
<b>0% přídavek metakaolínu</b>	1	149,18	149,68	22329	421,00	19,0	19,0
	2	149,49	149,56	22358	408,30	18,5	
	3	148,50	149,51	22202	429,73	19,5	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 130</b>	1	148,61	149,56	22226	618,67	27,5	26,5
	2	149,49	149,89	22407	559,39	25,0	
	3	149,63	146,80	21966	611,45	27,5	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 150</b>	1	148,41	149,31	22159	521,17	23,5	26,5
	2	149,43	148,13	22135	616,88	28,0	
	3	146,15	149,63	21868	631,48	29,0	
<b>5% přídavek metakaolínu S-META</b>	1	149,63	146,01	21848	584,20	26,0	27,5
	2	149,52	147,00	21979	612,60	28,0	
	3	149,66	145,665	21798	595,85	28,0	

**Tab. 23:** Pevnost v prostém tlaku po 7 dnech u receptury Z<sub>2</sub>

Název příměsi	Označení vzorku	Rozměry [mm]		Plocha A <sub>c</sub> [mm <sup>2</sup> ]	Síla F [kN]	f <sub>c</sub> [MPa]	Ø f <sub>c</sub> [MPa]
<b>0% přídavek metakaolínu</b>	1	147,25	149,48	22011	1550,50	70,5	73,0
	2	149,34	149,90	22386	1864,33	79,0	
	3	146,15	149,95	21915	1519,89	69,5	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 130</b>	1	148,97	149,66	22295	1850,28	83,0	82,5
	2	148,79	149,47	22240	1821,21	82,0	
	3	149,09	149,81	22335	1829,55	82,0	

**Tab. 23:** - pokračování

Název příměsi	Označení vzorku	Rozměry [mm]		Plocha $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Síla F [kN]	$f_c$ [MPa]	$\bar{\sigma} f_c$ [MPa]
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 150</b>	1	147,19	149,57	220115	1631,69	74	79,5
	2	147,38	149,46	22027	1885,81	85,5	
	3	148,88	149,5	22258	1764,25	79,5	
<b>5% přídavek metakaolínu S-META</b>	1	148,68	149,3	22198	1715,52	77,5	77,0
	2	149,36	149,27	22295	1829,29	82,0	
	3	149,69	149,41	22365	1595,63	71,5	

**Tab. 24:** Pevnost v prostém tlaku po 28 dnech u receptury  $Z_2$

Název příměsi	Označení vzorku	Rozměry [mm]		Plocha $A_c$ [mm <sup>2</sup> ]	Síla F [kN]	$f_c$ [MPa]	$\bar{\sigma} f_c$ [MPa]
<b>0% přídavek metakaolínu</b>	1	150,03	149,50	22429	2297,72	102,5	89,5
	2	149,81	145,80	21842	1810,06	83,0	
	3	149,46	146,61	21912	1815,86	83,0	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 130</b>	1	149,91	149,34	22388	2197,15	98,0	106,0
	2	149,54	149,42	22344	2489,03	111,5	
	3	149,79	150,21	22500	2441,11	108,5	
<b>5% přídavek metakaolínu I-META 150</b>	1	149,55	149,65	22380	2514,39	112,5	102,5
	2	149,43	149,70	22370	2409,89	108,0	
	3	149,51	146,81	21950	1935,98	87,5	
<b>5% přídavek metakaolínu S-META</b>	1	149,37	148,5	22181	2238,91	101,0	101,5
	2	149,54	149,83	22406	2250,64	100,5	
	3	149,64	149,01	22298	2307,14	103,5	

## 8. Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo zjištění vlivu konzistenčních vlastností metakaolínů firmy Sedlecký kaolín, a.s. na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Současně byly použité metakaolíny porovnávány s již dříve odzkoušenými druhy metakaolínů.

K zjištění daných vlastností a jejich vlivů na čerstvý a ztvrdlý beton byly použity tři druhy metakaolínů firmy Sedlecký kaolín, a.s. a to dva druhy metakaolínu I-META s lehce odlišnými parametry a metakaolín S-META (Tab. 25).

Pro přípravu jednotlivých receptur betonu byly záměrně zvoleny dvě zcela odlišné receptury, receptura betonu s nižší pevností  $Z_1$  a receptura vysokopevnostního betonu  $Z_2$ . Celkem bylo připraveno osm záměsí a to pro každou recepturu čtyři. Z počátku byly namíchány referenční betony a ke každé další záměsi bylo přidáno 5% metakaolínů I-META 130, I-META 150 a S-META.

**Tab. 25:** Hodnoty rozlití s vodou a v čerstvém betonu

Metakaolín	Míra rozlití s vodou [mm]	Míra rozlití betonu receptury $Z_1$ [mm]	Míra rozlití receptury $Z_2$ [mm]
<b>I-META 130</b>	130	390	460
<b>I-META 150</b>	150	380	460
<b>S-META</b>	230	370	400
<b>Referenční směs bez metakaolínu</b>	-	410	490

U všech modifikovaných záměsí receptur  $Z_1$  i  $Z_2$  se projevil kladný vliv metakaolínu na zvýšení konečných pevností ztvrdlého betonu. Tato skutečnost je dobře patrná např. u receptury  $Z_2$ , kdy 5 % přídavek metakaolínu I-META 130 zvýšil krychelnou pevnost betonu o cca 18 %. Toto zjištění je zcela v souladu s poznatky známými z literatury [22, 27].

V případě sledování vlivu konkrétního metakaolínu na konzistenci čerstvé cementové malty a betonu bylo zjištěno, že existuje nepřímá úměrnost mezi mírou rozprostření suspenze metakaolín – voda a konzistencí malty nebo betonu. Byly tak potvrzeny závěry některých předchozích výzkumů [26].

Zdůvodnění podstaty této závislosti nebylo předmětem předkládané bakalářské práce. V každém případě lze, na celkový závěr práce, konstatovat, že konkrétní metakaolín může výrazně ovlivňovat konzistenční vlastnosti betonu. Nelze proto souhlasit s často uváděným obecným tvrzením, že přítomnost metakaolínu v betonu zhoršuje jeho konzistenci.

## Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 196-3 *Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti – Část 3: Český normalizační institut*, 2005.
- [2] ČSN EN 197-1 *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. Český normalizační institut*, 2001.
- [3] ČSN EN 933-1 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. Český normalizační institut*, 1997.
- [4] ČSN EN 933-2 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 2: Stanovení zrnitosti – Zkušební síta, jmenovité velikosti otvorů. Český normalizační institut*, 1996.
- [5] ČSN EN 933-4 *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index. Český normalizační institut*, 2000.
- [6] ČSN EN 934 *Příklady do betonu, malty a injektážní malty. Český normalizační institut*, 2003.
- [7] ČSN EN 1008 *Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Český normalizační institut*, 2003.
- [8] ČSN EN 1097-3 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Český normalizační institut*, 1999.
- [9] ČSN EN 1097-6 *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Český normalizační institut*, 2000.
- [10] ČSN EN 12350-5 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím. Český normalizační institut*, 2000.
- [11] ČSN EN 12350-6 *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost. Český normalizační institut*, 2000.
- [12] ČSN EN 12390-2 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 2: Výroba a ošetřování zkušebních těles pro zkoušky pevnosti. Český normalizační institut*, 2001.
- [13] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Český normalizační institut*, 2002.
- [14] ČSN EN 12390-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu. Český normalizační institut*, 2001.

- [15] ČSN EN 12620 *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008.
- [16] <http://www.basf-cc.cz/>
- [17] <http://www.cluz.cz/>
- [18] <http://fast10.vsb.cz/206/>
- [19] <http://www.sedlecky-kaolin.cz/>
- [20] <http://www.stachema.cz/>
- [21] Koutník, P. et al.: *Tuzemské pucolány na bázi metakaolinitu*. In Sbor. V. odborné konference *MALTOVINY 2006*, FAST VUT Brno, Svaz výrobců cementu ČR, Brno. s. 95 – 102, ISBN 80-214-3322-1.
- [22] Koutník, P. et al.: *Vývoj technologie výroby pucolánů na bázi metakaolinitu*. In Sbor. semináře „*Metakaolín 2007*“ (Rovnaníková, P., Keršner, Z. ed.), FAST VUT v Brně, 2007, s. 55 – 662, ISBN 978-80-214-3339-1.
- [23] Ptíčen, F. et al.: *Metakaolíny připravené z kaolínů s odlišným mineralogickým s zrnitostním složením*. In Sbor. příspěvků semináře „*Metakaolín 2010*“, FAST VUT v Brně, 2010.
- [24] Pytlík, P.: *Technologie betonu*. VUT Brno, 2000.
- [25] Trojek, T.: *Přednášky KDAIZ*, ČVUT Praha.
- [26] Šafrata, J., Hurta, J., Vavro, M., Ptíčen, F.: *Vliv přísady metakaolínu na zlepšení parametrů vysokopevnostních betonů*. In Sbor. příspěvků semináře „*Metakaolín 2009*“ (Keršner, Z., Rovnaníková, P. eds.), FAST VUT v Brně, 2009, s. 156 – 161.



## Seznam tabulek

Tab. 1:	Chemicko-technologické vlastnosti jemnozrnných plavených kaolínů [23]
Tab. 2:	Chemicko-technologické vlastnosti středně hrubozrnných a hrubozrnných plavených kaolínů [23]
Tab. 3:	Porovnání konzistenčních vlastností testovaných metakaolínů [26]
Tab. 4:	Základní vlastnosti čerstvých betonů [26]
Tab. 5:	Chemické složení metakaolínu [Příloha 3 a 4]
Tab. 6:	Parametry zrnitosti a měrný povrch vstupních metakaolínů
Tab. 7:	Vodní součinitelé jednotlivých vstupních metakaolínů
Tab. 8:	Hodnota rozlití [19]
Tab. 9:	Sypná hmotnost
Tab. 10:	Sypná hmotnost volně sypaného kameniva
Tab. 11:	Sypná hmotnost setřeseného kameniva
Tab. 12:	Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva
Tab. 13:	Tvarový index zrn hrubého kameniva z lomu Bílčice
Tab. 14:	Konzistenční vlastnosti cementové malty s 10 % vybraných metakaolínů
Tab. 15:	Složení receptury $Z_1$ [kg]
Tab. 16:	Složení receptury $Z_2$ [kg]
Tab. 17:	Hodnoty rozlití pro recepturu $Z_1$ [mm]
Tab. 18:	Hodnoty rozlití pro recepturu $Z_2$ [mm]
Tab. 19:	Objemové hmotnosti pro recepturu $Z_1$ [kg/ m <sup>3</sup> ]
Tab. 20:	Objemové hmotnosti pro recepturu $Z_2$ [kg/ m <sup>3</sup> ]
Tab. 21:	Pevnost v prostém tlaku po 7 dnech u receptury $Z_1$
Tab. 22:	Pevnost v prostém tlaku po 28 dnech u receptury $Z_1$
Tab. 23:	Pevnost v prostém tlaku po 7 dnech u receptury $Z_2$
Tab. 24:	Pevnost v prostém tlaku po 28 dnech u receptury $Z_2$
Tab. 25:	Hodnoty rozlití s vodou a v čerstvém betonu

## Seznam obrázků

- Obr. 1. Mapa výskytu kaolínů v ČR
- Obr. 2. Kaolín ve formě nudliček [19]
- Obr. 3. Technologický postup výroby kaolínů [19]
- Obr. 4. Rotační pec ČLUZ [17]
- Obr. 5. Aparatura RTG-fluorescenční analýzy [25]
- Obr. 6. Vicatův přístroj s hustoměrným válečkem a pryžovým prstencem [18]
- Obr. 7. Křivka zrnitosti pro kamenivo Tovačov frakce 0/4
- Obr. 8. Křivka zrnitosti pro kamenivo Bílčice frakce 4/8
- Obr. 9. Křivka zrnitosti pro kamenivo Bílčice frakce 8/16
- Obr. 10. Dvoučelist'ové posuvné měřidlo pro stanovení tvarového indexu zrn [18]
- Obr. 11. Obsah kaolinitu v hrubozrnných až střednězrnných kaolínech [23]
- Obr. 12. Zkouška rozliti dle ČSN EN 12350-5 [10]

## Seznam příloh

Příloha 1	Přehled kvality produkce firmy Cement Hranice, a. s. pro CEM II/B-S 32.5 R
Příloha 2	Přehled kvality produkce firmy Cement Hranice, a. s. pro CEM I 42.5 R
Příloha 3	Technický list METAKAOLIN I META 4
Příloha 4	Technický list METAKAOLIN S META 4
Příloha 5	Granulometrie metakaolínu I-META 130
Příloha 6	Chemická analýza metakaolínu I-META 130
Příloha 7	Granulometrie metakaolínu I-META 150
Příloha 8	Chemická analýza metakaolínu I-META 150
Příloha 9	Granulometrie metakaolínu S-META
Příloha 10	Chemická analýza metakaolínu S-META
Příloha 11	Technický list WOERMENT FM 787
Příloha 12	Technický list MICROPORAN
Příloha 13	Technický list WOERMENT FM 794
Příloha 14	Technický list LENTAN VZ 33